

ФУНКЦИЯ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Д. А. Ковалева, О. Ю. Малков, А. Ю. Сытов,
А. В. Тутуков, Д. А. Чулков, Л. Р. Юнгельсон

Институт астрономии Российской академии наук

Приведен обзор проблем и задач, связанных с определением параметров функции звездообразования для двойных систем. Описан подход к исследованию начальных распределений двойных звезд по фундаментальным параметрам путем решения обратной задачи.

STAR FORMATION FUNCTION FOR BINARIES

D. A. Kovaleva, O. Y. Malkov, A. Y. Sytov,
A. V. Tutukov, D. A. Chulkov, L. R. Yungelson

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

We review tasks and problems related to determination of parameters of star formation function for binary systems. The approach toward investigation of initial distributions of binary stars over fundamental parameters via solving inverse problem is described.

Введение

Большинство звезд, доступных для исследования, оказываются двойными. Однако интерес исследователей к этим объектам вызван не только и не столько их многочисленностью, сколько разнообразием наблюдательных проявлений, позволяющим формировать и проверять наши представления о природе и эволюции звезд в целом. Благодаря динамической связи компонентов мы можем, в определенных случаях, прямыми способами определять физические характеристики системы и ее составляющих. В то же время взаимодействие между компонентами в ходе эволюции приводит к разнообразным астрофизическим явлениям и образованию различных объектов с привлекающими внимание наблюдательными проявлениями,

© Ковалева Д. А., Малков О. Ю., Сытов А. Ю.,
Тутуков А. В., Чулков Д. А., Юнгельсон Л. Р., 2018

например, новых, сверхновых, звезд Вольфа—Райе, пульсаров, источников гамма-излучения, рентгеновских и симбиотических двойных звезд. Поздние стадии эволюции тесных (взаимодействующих) двойных звезд бывают связаны с образованием компактных релятивистских объектов, таких как черные дыры и нейтронные звезды, слияния которых были впервые зарегистрированы по всплескам гравитационных волн в 2016—2017 гг.

Для решения многих астрофизических задач важно понимать, какими рождаются двойные звезды, как распределены массы их компонентов, какие параметры орбиты характерны для молодых двойных звезд. Эти распределения связаны с характеристиками процесса звездообразования, а в перспективе определяют, например, частоту вспышек сверхновых Ia и гравитационных всплесков, которые мы можем наблюдать. Комплекс начальных распределений рождающихся двойных звезд по фундаментальным параметрам (такими параметрами часто считают массы и отношения масс компонентов, большие полуоси и эксцентриситеты орбит; этот выбор будет обсуждаться далее) мы будем называть *функцией звездообразования* двойных звезд.

Методы определения функции звездообразования двойных звезд

Статистика наблюдательных данных о двойных системах

Простой подход к определению характеристик образующихся двойных звезд состоит в том, чтобы приписать им такие же распределения по фундаментальным параметрам, которые обнаруживаются в наблюдательных наборах данных. Такой подход, разумеется, имеет основания, так как наличие прямой связи между начальными и наблюдательными распределениями очевидно. Слабые места такого подхода, однако, тоже достаточно предсказуемы. Наблюдательное распределение не тождественно существующему в настоящее время распределению всех звезд из-за сильного влияния многочисленных эффектов наблюдательной селекции, искажающих статистические свойства популяции двойных звезд, а существующее в настоящее время распределение характеристик двойных отличается от начального благодаря эффектам эволюции. Чтобы избежать искажений или снизить их влияние, часто стараются рассматривать выборки, предположительно обладающие полнотой в определенном

объеме, или группы звезд близкого, предпочтительно молодого, возраста (скопления, ассоциации) [1]. Однако наблюдательные данные о двойных в скоплениях и ассоциациях довольно скудны и исчерпываются обычно степенью кратности звезд ансамбля и распределением по угловому расстоянию между компонентами (см., например, [2, 3], а для молодых звездных ансамблей затруднительны из-за обилия пыли и газа [4]. Требование полноты ансамбля в объеме достаточно трудновыполнимо и часто ведет либо к небольшому объему выборки [5, 6], либо к значительным допускам в трактовке понятия полноты (ср., например, работы [7] и [8], каждая из которых в свое время претендовала на полноту для звезд близких спектральных классов почти в одном и том же объеме). В связи с этим в течение многих лет продолжает оставаться полезным и исследование статистических распределений на материале больших каталогов [9–14].

Построение статистических распределений на материале выборок проэволюционировавших двойных звезд, к тому же искаженных эффектами наблюдательной селекции, приводит к значительному разбросу оценок характера распределений двойных по характеристикам.

Так, наиболее популярные оценки характера распределения двойных звезд по большим полуосям орбит сводятся к двум вариантам:

- степенное распределение

$$f(a) \sim a^{-\alpha} \quad (1)$$

в терминах плотности вероятности, при $\alpha = 1$ представляющее собой плоское в логарифмической шкале распределение, т. н. закон Эпика [15], и

- гауссово (или подобное ему) распределение по $\log a$ (или $\log P$), впервые предложенное Койпером [16].

Значительная часть современных статистических исследований двойных звезд обнаруживает логнормальное распределение по разделению между компонентами [7, 8, 17], однако диапазон расстояний (и периодов), в которых обнаруживается это распределение, настолько широк, что невозможно объяснить его результатом некоторого единого процесса ([12], см. также следующий раздел). С другой стороны, распределение по Эпику может быть интерпретировано как результат динамической релаксации при гравитационных взаимодействиях в скоплении [12] и имеет, таким образом, ясный физический смысл. Существуют интерпретации логнормального распределения (см., например, [1, 18, 19]) как результата искажения ло-

гарифмически плоского (динамической эволюцией, например, распадом части широких пар в более населенных звездных областях из-за гравитационного воздействия третьих тел, или недоучетом эффектов селекции) или совместным действием нескольких механизмов образования двойных, причем для разных разделений между компонентами доминируют разные сценарии.

Распределение по эксцентриситетам, как отмечают Токовинин и Кияева [20], является важным диагностическим критерием для теорий образования двойных звезд. Как известно, в тесных парах с периодом обращения меньше ~ 10 дней быстро происходит приливная циркуляризация орбит. Для более широких двойных, однако, эксцентриситеты, по-видимому, остаются неизменными [21], по крайней мере до тех пор, пока компоненты остаются на главной последовательности и не оказывают влияния на эволюцию друг друга. С физической точки зрения предпочтение отдается так называемому «тепловому» распределению, предложенному Амбарцумяном [22]:

$$f(e) \sim 2e. \quad (2)$$

В то же время исследования в различных выборках позволяют делать выводы и о «колоколообразном» [7], и о равномерном [8], и о степенном (но более «мягком», с меньшим показателем степени, чем у теплового) [20] видах распределения по эксцентриситетам. Отметим, что само определение эксцентриситетов возможно, как правило, для очень ограниченной выборки двойных звезд, что дополнительно затрудняет задачу, увеличивая количество задействованных эффектов селекции (добавляя т. н. «вычислительную селекцию»).

Исследование наблюдательных выборок и их свойств нередко приводит к выводам о связи распределений по некоторым параметрам, которые рассматривают в качестве фундаментальных (например, по расстояниям между компонентами и массой главного компонента [1]; по отношениям масс компонентов и по периоду или расстоянию между компонентами [8, 23]; по эксцентриситетам и периодам даже для широких пар [7]). В этих случаях требуется выяснять, объясняются ли наблюдаемые тренды, например, эффектами звездной и динамической эволюции или связаны с самими процессами рождения двойных систем.

Кроме того, тесные и широкие двойные системы зачастую демонстрируют разные статистические характеристики в отношении фундаментальных распределений (см., например, [7, 13, 14]). Так, в частности, среди тесных двойных оказывается избыточно много т. н.

«близнецов» — пар с близкими по массе компонентами (и соответственно отношением масс $q = M_2/M_1 \approx 1$), что может оказаться как следствием эффекта селекции (такие двойные имеют более высокую вероятность открытия как спектральные или затменно-двойные), так и отражением свойств процесса звездообразования (см. следующий раздел).

Еще в 1980-х гг., подробно исследовав и обобщив доступные на то время наблюдательные характеристики всех известных двойных систем (см., например, [13, 14, 24]), группа исследователей, возглавляемая А. В. Тутуковым и Л. Р. Юнгельсоном, предложила следующий обобщенный вид для функции звездообразования широких двойных звезд:

$$d^3V = M_1^{-2.5} dM_1 \cdot 0.2 d \log a \cdot q^{-2} dq \text{ yr}^{-1}, \quad (3)$$

где M_1 и a выражены в солнечных единицах.

О степени кратности звездного ансамбля

Долю двойных (и кратных) звезд в популяции характеризуют частотой встречаемости (Multiplicity frequency, MF):

$$MF = (B + T + Q + \dots) / (S + B + T + Q + \dots) \leq 1 \quad (4)$$

или долей вторичных компонентов (Companion star fraction, CF):

$$CF = (B + 2T + 3Q + \dots) / (S + B + T + Q + \dots), \quad (5)$$

которая может превышать 1. Хорошо известен и успешно воспроизводится моделированием тот факт, что MF существенно зависит от массы главного компонента и уменьшается с ее уменьшением. Вопрос скорее в том, каковы же на самом деле значения MF для различных главных компонентов. Современные наблюдательные оценки [1] имеют несколько больший разброс для М-карликов, в среднем указывая на $MF \approx 20\%$, и лучше согласуются для массивных звезд, доходя до $MF \approx 60\%$. Токовинин [25] дает $MF = 46\%$ для F-, G-карликов в окрестности Солнца, что хорошо согласуется с более ранней усредненной оценкой $44 \pm 2\%$ из [1].

Из общих соображений можно было бы ожидать, что MF уменьшается с возрастом рассматриваемой популяции звезд, по крайней мере из-за распада части широких двойных. Однако, как отмечают Дюшен и Краус [1] в своем подробном обзоре, при сравнении разных

популяций такого тренда обнаружить не удастся, возможно, из-за его незначительности на фоне других неопределенностей, связанных с определением МР.

Моделирование процессов звездообразования

Иной подход к определению параметров образования двойных систем предполагает моделирование физических процессов в области звездообразования.

Предполагается, что двойные звезды могут образовываться в различных процессах. Так, Бейт в обзоре [26] перечисляет:

- гравитационный захват (предполагающий изначальное раздельное формирование компонентов и требующий рассеяния избытка энергии в гравитационно возмущенном околозвездном диске) — процесс, по-видимому, возможный, но реализующийся в основном в специфических условиях, в небольших тесных группах молодых звезд с низкими относительными скоростями;
- расщепление быстровращающейся протозвезды — одно из первых представлений о механизме возникновения двойных звезд, которое, однако, не удается воспроизвести в гидродинамических расчетах;
- гравитационная фрагментация, (а) «быстрая», порожденная гравитационной неустойчивостью в протозвездном облаке и ведущая к формированию кратной системы, и (б) фрагментация достаточно массивного и холодного диска около протозвезды.

Последний из названных процессов (гравитационная фрагментация) в настоящее время рассматривается [26] как ведущий в образовании двойных звезд. В связи с этим фундаментальным параметром образования двойных систем при моделировании процесса, связанного с аккрецией, оказывается скорее угловой момент двойной, а не расстояние между компонентами и их массы по отдельности.

Определенные характеристики наблюдательного ансамбля двойных и кратных звезд были хорошо воспроизведены в гидродинамических расчетах Бейта, учитывавших гравитационные и гидродинамические взаимодействия, а также простое уравнение состояния [27] (МР, отношения масс компонентов для маломассивных систем). Однако полученная начальная функция масс существенно отличалась от ожидаемой за счет переизбытка маломассивных звезд (коричневых карликов), а двойные с главным компонентом типа Солнца при

этом не получали достаточного количества маломассивных спутников. Для того чтобы воспроизвести статистические характеристики наблюдательного ансамбля с большей полнотой, потребовалось ввести в расчеты еще и обратную связь от излучения (radiative feedback) [28]. Таким образом, основными физическими процессами, создающими статистические характеристики двойных звезд, по-видимому, оказываются диссипативные динамические взаимодействия и взаимодействие посредством излучения между протозвездами, образующимися в группах или скоплениях [26]. Основная доля двойных звезд образуется в ходе гравитационной фрагментации, причем, по-видимому, быстрая фрагментация (из-за неоднородностей газа) играет доминирующую роль, но и фрагментация в диске также реализуется, и, весьма вероятно, ее роль значительна. Захваты могут случаться в небольших скоплениях.

Гидродинамические расчеты позволяют или, наоборот, не позволяют воспроизвести некоторые особенности статистических характеристик двойных звезд. Так, динамические взаимодействия между протозвездами, как было показано [29], могут быть ответственными за обмен компонентами у тесных пар, который делает предпочтительным образование пар с компонентами-«близнецами». С другой стороны, Кроупа и Буркерт [30] показали, что предположение унимодального начального распределения по большим полуосьм орбит/периодам не может быть согласовано с наблюдаемыми распределениями.

Подробное исследование вопроса о том, какие функции массы двойной системы и/или ее компонентов могут являться фундаментальными и к каким результатам при моделировании процесса звездообразования это приводит, было предпринято Ковенхофеном и др. [31]. Было разработано множество сценариев образования двойной (pairing scenarios, PS), в которых разными законами определяются массы компонентов, и/или масса системы, и/или отношение масс компонентов. В дальнейшем мы будем использовать и исследовать некоторые из этих сценариев.

Определение функции звездообразования двойных звезд путем решения обратной задачи

Можно рассмотреть проблему определения параметров функции звездообразования двойных звезд как обратную задачу нахождения начальных распределений двойных по фундаментальным параметрам

рам, исходя из наблюдательных распределений ансамбля двойных звезд по наблюдаемым характеристикам. Как это свойственно обратным задачам, она некорректна и может решаться только при условии наложения дополнительных ограничений на свойства искоемых распределений. В качестве таких дополнительных ограничений мы опробовали как существующие гипотезы о виде начальных распределений двойных по фундаментальным параметрам, описанные в предыдущих разделах, так и некоторые экстремальные варианты. Нашей задачей было выбрать гипотезы, согласующиеся с наблюдаемыми распределениями, и отвергнуть те, согласовать которые с наблюдениями невозможно. Гипотезы, не предполагавшиеся ранее на основе статистических свойств наблюдательного ансамбля, были введены в рассмотрение специально для исследования и внутреннего контроля метода.

В качестве исходного набора наблюдательных данных была использована выборка двойных звезд из каталога визуальных двойных звезд WDS [32] V класса светимости и находящихся в радиусе 500 пк (на основании тригонометрических параллаксов Gaia DR1 TGAS [33]). Для этой очищенной выборки были исследованы эффекты наблюдательной селекции и выделена область в пространстве параметров, свободная от обусловленной ими наблюдательной неполноты: угловое разделение между компонентами было ограничено пределами от 2 до 200 секунд дуги при блеске главного компонента ярче 9.5 звездной величины, вторичного компонента — ярче 11.5 звездной величины и разности блеска не более 4 звездных величин (подробнее о построении выборки см. [10, 11]).

Мы использовали метод Монте-Карло для симулирования синтетического ансамбля двойных с такими же наблюдательными ограничениями, исходя из различных комбинаций начальных распределений по фундаментальным параметрам: четырех PS; двух вариантов начальной функции масс (Солпитера [34] и Кроуны [35]) для масс компонентов или систем в зависимости от PS; трех различных распределений по отношению масс компонентов q (для тех PS, которые допускают q как свободный параметр); трех вариантов распределения по расстоянию между компонентами и трех вариантов распределения по эксцентриситетам. Всего были рассмотрены 144 комбинации начальных распределений. Для каждой из этих комбинаций была смоделирована ближняя окрестность Солнца в пределах 500 пк, заполненная исключительно двойными звездами, сформировавшимися по описанным сценариям. При этом звезды сразу

приобретали статус одиночных, если их компонент имел субзвездную массу $M_2 \leq 0.08 M_{\odot}$. Существование кратных звезд мы на этом этапе игнорировали в силу большого количества неопределенностей, связанного с их образованием, и недостаточного наблюдательного материала. Плотность звезд была нормирована на определенную по Gaia DR1 [36]. Мы приняли барометрический закон распределения звезд по z и пренебрегли радиальным градиентом и поглощением в силу того, что рассматривается относительно близкая окрестность Солнца. Звезды рождались в соответствии с принятой скоростью звездообразования [37], зависящей от времени, и эволюционировали в соответствии с приближенными формулами Харли и др. [38]. И наконец, мы «провели наблюдения» каждого из синтетических ансамблей двойных звезд в той же области пространства параметров, которая была определена для наблюдательного набора, и сравнили результаты.

Критерии для сравнения результатов мы выделили следующие:

- количество звезд, «наблюдаемых» в синтетическом наборе данных, должно быть не меньше количества звезд в наблюдательной выборке (можно допустить, что выборка неполна, но не наоборот). Для учета стохастических отклонений мы формулируем требование как $N_{\text{synt}} > N_{\text{obs}} - \sqrt{N_{\text{obs}}}$, где $N_{\text{synt}}, N_{\text{obs}}$ — соответственно количество данных в синтетическом и наблюдательном ансамблях. Рисунок 1 показывает доли комбинаций начальных распределений, которые приводят к приемлемым и отвергаемым по этому критерию результатам. Сценарии, в которых количество «наблюдаемых» в синтетическом наборе двойных звезд превышает количество звезд в наблюдательной выборке на порядки, вызывают сомнения, однако на данном этапе не отвергаются;
- аналогичное требование выдвигается к частоте встречаемости MF двойных звезд (4). Для каждой комбинации начальных распределений мы рассчитываем, какая доля звезд будет наблюдаться как двойные (прочие считаются одиночными, так как имеют компонент субзвездной массы, или наблюдаются как одиночные из-за эффектов наблюдательной селекции; пары, которые не наблюдаются вообще, в расчет MF не входят). Мы не знаем, какова в точности MF в наблюдательном ансамбле, однако знаем, что она увеличивается с массой главного компонента и что для наименее массивных главных компонентов она составляет по крайней мере 20 %. Эту величину

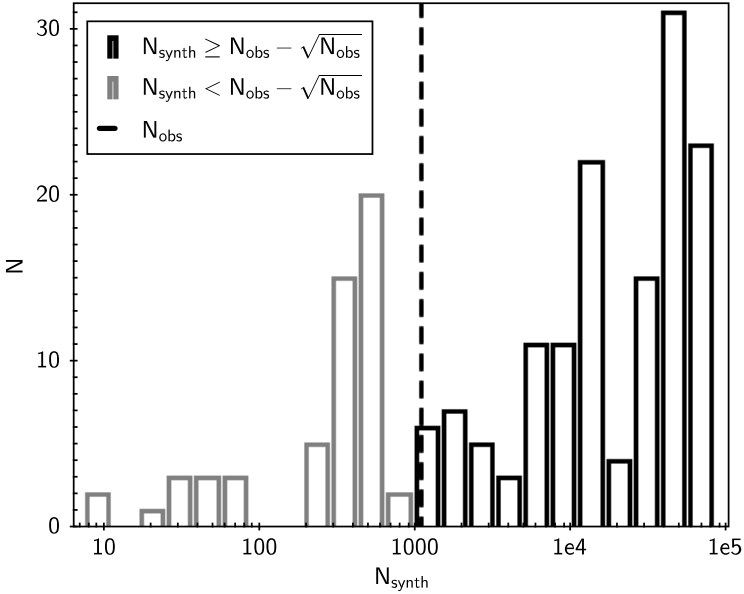


Рис. 1. Распределение модельных комбинаций начальных распределений по количеству двойных звезд, «наблюдаемых» в синтетической выборке. Серые столбцы соответствуют отвергаемым на основании этого критерия комбинациям начальных распределений, черные — неотвергаемым. Штриховая линия указывает количество двойных в наблюдательной выборке

можно принять за нижнюю границу MF в синтетических данных. Рисунок 2 иллюстрирует тот факт, что значительная доля сценариев приводит к неприемлемым значениям MF;

- наконец, можно сравнить распределения по наблюдательным параметрам (блеску и разности блеска компонентов, угловому и абсолютному расстоянию между компонентами) и рассчитать статистики, характеризующие их различия. Мы используем двухвыборочные статистики χ^2 Пирсона и D_{KS} Колмогорова—Смирнова, планируя, что они помогут нам сделать выбор между комбинациями начальных распределений, удовлетворяющими двум первым критериям.

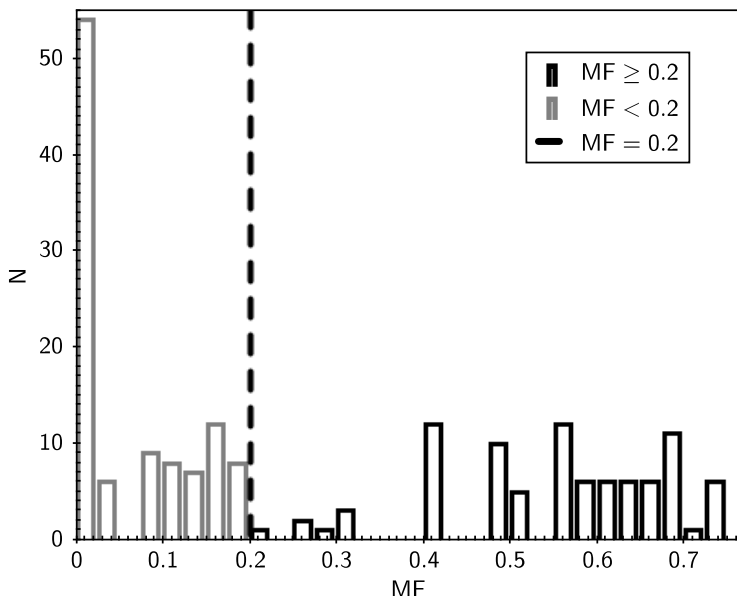


Рис. 2. Распределение модельных комбинаций начальных распределений по доле двойных звезд MF, «наблюдаемых» в синтетической выборке. Серые столбцы соответствуют отвергаемым на основании этого критерия комбинациям начальных распределений, черные — неотвергаемым. Штриховая линия указывает $MF = 0.2$, принятое как минимально допустимое

Предварительные выводы, сделанные на основании моделирования описанного наблюдательного набора, оказались следующими:

- в целом приниматься или отвергаться могут не отдельные начальные распределения по фундаментальным характеристикам (PS, НФМ, отношение масс, расстояние между компонентами, эксцентриситетам), а их комбинации. Из распределений по отдельным параметрам можно уверенно наложить ограничение на распределение по большой полуоси орбиты: в (1) $\alpha \geq -1.5$;
- начальное распределение по эксцентриситетам слабо влияет на наблюдательные распределения, и, скорее всего, на него наложить ограничения не удастся;
- для выбора между НФМ Солпитера и Кроуи, по-видимому,

требуется больше сведений о маломассивных двойных; для выбора между начальными распределениями по отношению масс больше наблюдательных данных о системах с большими значениями q . Таким образом, требуется привлекать к моделированию и другие наблюдательные выборки.

В момент написания этого текста наша группа анализирует результаты моделирования новых наблюдательных выборок, основанных как на данных о визуальных двойных WDS, так и на полных в объеме обзорах двойственности и кратности звезд спектральных классов A, F-G, M [5, 6, 8, 25, 39] и покрывающих разные области в пространстве параметров. Мы планируем получить согласованные результаты в отношении предпочтительных и, наоборот, недопустимых комбинаций начальных распределений для двойных систем и, таким образом, определить путем решения обратной задачи ограничения, накладываемые наблюдательными данными на функцию звездообразования двойных звезд.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 15-02-04053 и программы Президиума РАН № 28 «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

Библиографические ссылки

1. *Duchêne G., Kraus A.* Stellar Multiplicity // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 51. — P. 269–310.
2. *King R. R., Goodwin S. P., Parker R. J., Patience J.* Testing the universality of star formation - II. Comparing separation distributions of nearby star-forming regions and the field // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 427. — P. 2636–2646. 1209.2415.
3. *Lada C. J., Lada E. A.* Embedded Clusters in Molecular Clouds // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 41. — P. 57–115. astro-ph/0301540.
4. *Luhman K. L., McLeod K. K., Goldenson N.* A Hubble Space Telescope Search for Substellar Companions in the Young Cluster IC 348 // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 623. — P. 1141–1156. astro-ph/0501537.
5. *Ward-Duong K., Patience J., De Rosa R. J. et al.* The M-dwarfs in Multiples (MINMS) survey - I. Stellar multiplicity among low-mass stars within 15 pc // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 449. — P. 2618–2637. 1503.00724.
6. *De Rosa R. J., Patience J., Wilson P. A. et al.* The VAST Survey - III. The multiplicity of A-type stars within 75 pc // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 437. — P. 1216–1240. 1311.7141.

7. *Duquenois A., Mayor M.* Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood. II - Distribution of the orbital elements in an unbiased sample // *Astron. Astrophys.* — 1991. — Vol. 248. — P. 485–524.
8. *Raghavan D., McAlister H. A., Henry T. J. et al.* A Survey of Stellar Families: Multiplicity of Solar-type Stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2010. — Vol. 190. — P. 1–42.
9. *Andrews J. J., Chanamé J., Agüeros M. A.* Wide binaries in Tycho-Gaia: search method and the distribution of orbital separations // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 472. — P. 675–699. 1704.07829.
10. *Kovaleva D., Malkov O., Yungelson L., Chulkov D.* Visual binary stars: data to investigate formation of binaries // *Baltic Astronomy.* — 2016. — Vol. 25. — P. 419–426. 1701.00421.
11. *Kovaleva D., Malkov O., Yungelson L. et al.* Statistical analysis of a comprehensive list of visual binaries // *Baltic Astronomy.* — 2015. — Vol. 24. — P. 367–378. 1606.06784.
12. *Poveda A., Allen C., Hernández-Alcántara A.* The Frequency Distribution of Semimajor Axes of Wide Binaries: Cosmogony and Dynamical Evolution // *Binary Stars as Critical Tools for Tests in Contemporary Astrophysics* / ed. by W. I. Hartkopf, P. Harmanec, E. F. Guinan : IAU Symposium. — 2007. — Vol. 240. — P. 417–425. 0705.2021.
13. *Vereshchagin S., Tutukov A., Iungelson L. et al.* Statistical study of visual binaries // *Astrophys. Space. Sci.* — 1988. — Vol. 142. — P. 245–254.
14. *Popova E. I., Tutukov A. V., Yungelson L. R.* Study of physical properties of spectroscopic binary stars // *Astrophys. Space. Sci.* — 1982. — Vol. 88. — P. 55–80.
15. *Öpik E.* Statistical Studies of Double Stars: On the Distribution of Relative Luminosities and Distances of Double Stars in the Harvard Revised Photometry North of Declination -31 deg // *Publications of the Tartu Astrofizika Observatory.* — 1924. — Vol. 25.
16. *Kuiper G. P.* The Nearest Stars // *Astrophys. J.* — 1942. — Vol. 95. — P. 201.
17. *Tokovinin A.* From Binaries to Multiples. I. Data on F and G Dwarfs within 67 pc of the Sun // *Astron. J.* — 2014. — Vol. 147. — P. 86.
18. *Tokovinin A.* Formation of wide binary stars from adjacent cores // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 468. — P. 3461–3467. 1703.06794.
19. *Poveda A., Allen C.* The distribution of separations of wide binaries of different ages // *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series* / ed. by C. Allen, C. Scarfe : *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series.* — 2004. — Vol. 21. — P. 49–57.

20. *Tokovinin A., Kiyaeva O.* Eccentricity distribution of wide binaries // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2016. — Vol. 456. — P. 2070–2079. 1512.00278.
21. *Marks M., Kroupa P., Oh S.* An analytical description of the evolution of binary orbital-parameter distributions in N-body computations of star clusters // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2011. — Vol. 417. — P. 1684–1701. 1106.5050.
22. *Амбарцумян В. А.* // Астрон. журн. — 1937. — Т. 14. — С. 207.
23. *Мое М., Di Stefano R.* Mind Your Ps and Qs: The Interrelation between Period (P) and Mass-ratio (Q) Distributions of Binary Stars // Astrophys. J. Suppl. Ser. — 2017. — Vol. 230. — P. 15. 1606.05347.
24. *Масевич А. Г., Тутуков А. В.* Эволюция звезд: Теория и наблюдения. — М. : Наука, 1988.
25. *Tokovinin A.* From Binaries to Multiples. II. Hierarchical Multiplicity of F and G Dwarfs // Astron. J. — 2014. — Vol. 147. — P. 87.
26. *Bate M. R.* Origins of the Statistical Properties of Binary Systems // Living Together: Planets, Host Stars and Binaries / ed. by S. M. Rucinski, G. Torres, M. Zejda : Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2015. — Vol. 496. — P. 37.
27. *Bate M. R.* Stellar, brown dwarf and multiple star properties from hydrodynamical simulations of star cluster formation // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2009. — Vol. 392. — P. 590–616. 0811.0163.
28. *Bate M. R.* Stellar, brown dwarf and multiple star properties from a radiation hydrodynamical simulation of star cluster formation // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2012. — Vol. 419. — P. 3115–3146. 1110.1092.
29. *Bate M. R., Bonnell I. A., Bromm V.* The formation of close binary systems by dynamical interactions and orbital decay // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2002. — Vol. 336. — P. 705–713. astro-ph/0212403.
30. *Kroupa P., Burkert A.* On the Origin of the Distribution of Binary Star Periods // Astrophys. J. — 2001. — Vol. 555. — P. 945–949. astro-ph/0103429.
31. *Kouwenhoven M. B. N., Brown A. G. A., Goodwin S. P. et al.* Exploring the consequences of pairing algorithms for binary stars // Astron. Astrophys. — 2009. — Vol. 493. — P. 979–1016. 0811.2859.
32. *Mason B. D., Wycoff G. L., Hartkopf W. I. et al.* VizieR Online Data Catalog: The Washington Visual Double Star Catalog (Mason+ 2001-2014) // VizieR Online Data Catalog. — 2016. — Vol. 1.
33. *Lindegren L., Lammers U., Bastian U. et al.* Gaia Data Release 1. Astrometry: one billion positions, two million proper motions and parallaxes // Astron. Astrophys. — 2016. — Vol. 595. — P. A4. 1609.04303.

34. *Salpeter E. E.* The Luminosity Function and Stellar Evolution // *Astrophys. J.* — 1955. — Vol. 121. — P. 161.
35. *Kroupa P.* On the variation of the initial mass function // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2001. — Vol. 322. — P. 231–246. [astro-ph/0009005](#).
36. *Bovy J.* Stellar inventory of the solar neighbourhood using Gaia DR1 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 470. — P. 1360–1387. [1704.05063](#).
37. *Yu S., Jeffery C. S.* The gravitational wave signal from diverse populations of double white dwarf binaries in the Galaxy // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 521. — P. A85. [1007.4267](#).
38. *Hurley J. R., Pols O. R., Tout C. A.* Comprehensive analytic formulae for stellar evolution as a function of mass and metallicity // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2000. — Vol. 315. — P. 543–569. [astro-ph/0001295](#).
39. *Cortés-Contreras M., Béjar V. J. S., Caballero J. A. et al.* CARMENES input catalogue of M dwarfs. II. High-resolution imaging with FastCam // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 597. — P. A47. [1608.08145](#).